

降雨对 C 波段散射计测风的影响及其校正*

周旋¹⁾²⁾ 杨晓峰^{1)†} 李紫薇¹⁾ 于暘¹⁾ 马胜¹⁾

1) (中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

2) (中国人民解放军 61741 部队, 北京 100095)

(2011 年 8 月 22 日收到; 2011 年 11 月 14 日收到修改稿)

传统观点认为 C 波段散射计工作波长大于雨滴直径, 受降雨散射衰减的影响很小, 因此往往忽略降雨对 C 波段散射计测风的影响. 本文基于降雨引起 C 波段散射计信号的衰减、后向体散射及雨滴落入海面后的扰动作用, 推导了降雨条件下的雷达方程, 构建了 2010 年全年的 ASCAT 散射计、降雨雷达和欧洲中期天气预报中心数值预报的匹配数据集, 定量分析了降雨对 C 波段散射计测风的影响, 发现其信号衰减随降雨强度和入射角的增大而增强; 后向体散射和雨表面扰动作用随降雨强度的增大而增强、随入射角的增大而减小, 其中雨表面扰动作用对散射计测风的影响大于后向体散射. 另外, 利用降雨条件下的雷达方程和匹配数据集, 本文建立了降雨条件下的 C 波段主动微波辐射传输模型, 实验表明, 该模型能够改善降雨条件下 C 波段散射计测风的精度.

关键词: 降雨强度, C 波段散射计, 辐射传输模型, 海面风场

PACS: 92.40.eg, 93.85.-q, 84.40.Xb, 92.60.Gn

1 引言

海面风场作为海洋环流的主要驱动力, 通过调制海洋-大气之间的热通量、水汽通量以及二氧化碳等气体通量, 影响全球和地区的气候. 监测海面风场对于理解海洋-大气之间的相互作用以及开展海洋、大气领域的相关研究至关重要. 星载微波散射计以其全天候、全天时、高覆盖度等优势而成为海面风场测量的主要工具, 所获取的风场信息广泛应用于天气预报、风暴监测等领域.

星载微波散射计的工作频段主要采用 Ku 波段和 C 波段, 其通过向海表面发射脉冲信号并接收布拉格共振散射后的回波信号, 然后利用海面粗糙度与海面风速风向的定量关系来探测海面风场信息. 在降雨条件下, 散射计的测风精度将受到影响, 主要原因可归结为三个方面: 雨滴在大气中对散射计

信号产生衰减, 使回波信号能量减弱; 雨滴下降时对散射计信号产生后向散射, 增加了回波信号能量; 雨滴落入海水时, 对水面产生扰动, 改变了海表面粗糙度, 进而影响了回波信号的能量.

关于降雨对散射计测风的影响, 国内外学者开展了大量的研究工作^[1-4], 主要集中在 Ku 波段. 对于 C 波段散射计, 传统观点认为由于雷达波长大于雨滴直径, 其受降雨散射衰减的影响很小, 因此往往忽略降雨对其信号的影响. 近年来, 随着 Ku 波段的 QuikSCAT 散射计失效, C 波段的 ASCAT 散射计已成为全球主要在轨业务运行的散射计, 降雨对 C 波段散射计测风的影响逐渐引起国外一些研究学者的注意. Nie 和 Long^[5] 利用 ERS-1/2 卫星上的 ESCAT 散射计数据和热带降水测量卫星 (TRMM) 上的降雨雷达 (PR) 数据评估了测风精度与降雨率之间的关系, 发现在一定的降雨率和入射角条件下, C 波段散射计测风的精度受降雨影响

* 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目专项 (批准号: Y0S04300KB)、中国科学院重大科研装备研制项目 (批准号: YZ200946) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2006AA09Z137) 资助的课题.

† E-mail: yangxf@irsa.ac.cn

很大.

降雨对散射计测风的主要影响因素包括雨滴衰减、雨滴后向体散射和雨表面扰动, 其中前两个方面已有成熟的经验模型, 而对于雨表面扰动的研究成果很少. Craeye 等^[6], Bliven 等^[7] 在实验室测量了降雨引起的海表面后向散射, 但该成果仅涉及 Ku 波段单入射角的情况; Owen 和 Long 等在文献^[8] 中从同时反演海面风场和降雨强度的角度, 研究了高入射角条件下降雨引起海表面扰动的问题. 为了校正降雨对散射计测风的影响, 本文推导了降雨条件下的雷达方程, 然后利用 2010 年全年的 ASCAT 散射计数据、PR 数据及欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 简记为 ECWMF) 发布的数值预报数据建立匹配数据集, 定量分析了降雨对散射计测风的影响, 提出了用于改善降雨条件下散射计测风精度的校正模型即 C 波段主动微波辐射传输模型, 最后利用卫星观测数据对模型进行了实验验证.

2 降雨条件下的雷达方程

星载微波散射计属于主动雷达系统, 其探测海面风场的雷达方程^[9] 为

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2 A}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_0, \quad (1)$$

式中, P_R 是接收的雷达功率, P_T 是发射的雷达功率, G_T 是天线传输能量的增益, G_R 是天线接收电磁波的能量增益, λ 是雷达工作波长, A 是被探测海表面的面积, R 是卫星与被探测海表面的距离, σ_0 是被探测海表面的标准化雷达后向散射截面, 利用其与海面风场的定量关系即地球物理模式函数能够反演海面风场.

在降雨条件下, 散射计探测的标准化雷达后向散射截面 σ_0 受到雨滴对散射计信号的衰减、后向散射及雨滴落入海面时的扰动等因素影响, 利用地球物理模式函数反演的海面风场出现较大的误差. 下面将详细地推导降雨条件下的雷达方程, 为定量分析降雨对散射计测风的影响、建立降雨条件下海面风场反演的校正模型奠定理论基础.

2.1 雨滴的衰减

当散射计信号投射到降雨粒子上时, 一部分能量被粒子吸收, 变成热能或其他形式的能量; 另一部分能量被粒子散射, 使原来入射方向的散射计信号能量受到削弱. 这两种作用造成散射计信号的衰减. 由于散射计信号在往返的路径上受到二次衰减, 降雨引起信号衰减与降雨强度的关系可表示为^[10]

$$K = 10^{-0.2 \int_0^H k dr}, \quad (2)$$

式中, K 为降雨对散射计信号的衰减因子; H 为降雨高度; k 为衰减系数, 单位为 $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$, 当波长为 5.7 cm 时, $k = 0.0031R$, R 为降雨强度, 单位为 mm/h .

2.2 雨滴的后向体散射

散射计发射的微波信号通过降雨粒子时, 一部分能量要返回散射计方向, 产生后向散射, 从而增加散射计测量的海面后向散射系数. 雨滴的后向体散射系数可表示为^[11]

$$\sigma_r = 10^{-10} \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K_w|^2 Z_e, \quad (3)$$

式中, σ_r 为单位体积的后向散射系数, 单位为 m^{-1} ; λ 为波长, 单位 cm ; $K_w = (n^2 - 1)/(n^2 + 2)$, n 为水的复折射指数, 这里取 $8.563 + 1.080i$; Z_e (mm^6/m^3) 为有效反射率因子, 与降雨率的关系表示为 $Z_e = 210R^{1.6}$.

雨滴对微波信号产生的后向散射, 在返回散射计过程中, 同时受到降雨粒子的衰减作用. 令 H 为整个降雨层的厚度, Δr 为微分降雨层的厚度, r 为微分降雨层的下层降雨厚度, 各降雨层的几何关系如图 1 所示.

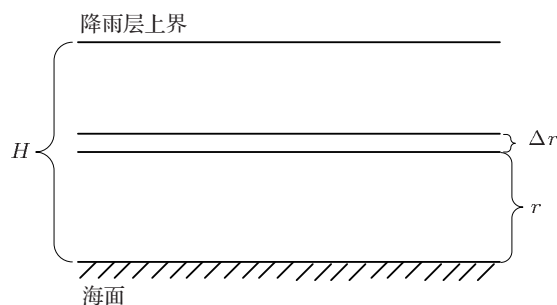


图 1 降雨层的几何关系

层厚为 Δr 微分降雨层的后向体散射截面

为 $10^{-10} \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K_w|^2 Z_e \Delta r$, 经厚度为 $H-r$ 的降雨层衰减后的后向散射截面为 $10^{-10} \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K_w|^2 Z_e \Delta r \cdot 10^{-0.2 \int_r^H k ds}$, 对于整个降雨层, 雨滴产生的后向体散射经过降雨衰减后到达散射计的后向散射截面, 即降雨产生的有效后向体散射截面为

$$\sigma_{rv} = \int_0^h 10^{-10} \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K_w|^2 \times Z_e(r) \cdot 10^{-0.2 \int_r^H k ds} dr, \quad (4)$$

式中, σ_{rv} 表示降雨产生的有效后向体散射截面.

2.3 雨表面扰动

雨滴落入海面后, 通过对海面的冲击, 在海面产生重力毛细波、次表层涡环和引起垂直混合, 进而改变海面的粗糙度, 影响海面的后向散射系数.

散射计探测的海面后向散射截面与海面粗糙度有关, 在降雨条件下, 海面粗糙度由海面风场和降雨决定, 其中, 海面风场引起的后向散射截面记为 σ_{wind} , 雨表面扰动引起的后向散射截面记为 σ_{surf} , 这两种作用可认为是加性的, 因此, 降雨条件下, 散射计探测的海面后向散射截面可记为 $\sigma_{wind} + \sigma_{surf}$.

综上所述, 考虑到雨滴的衰减、后向体散射及雨表面扰动, 降雨条件下的雷达方程可表述为

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2 A}{(4\pi)^3 R^4} \left[(\sigma_{wind} + \sigma_{surf}) \cdot 10^{-0.2 \int_0^H k dr} + \int_0^H 10^{-10} \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K_w|^2 Z_e(r) \times 10^{-0.2 \int_r^H k ds} dr \right]. \quad (5)$$

散射计测量的 σ_0 可表示为

$$\sigma_0 = (\sigma_{wind} + \sigma_{surf}) \cdot 10^{-0.2 \int_0^H k dr} + \int_0^H 10^{-10} \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K_w|^2 Z_e(r) \cdot 10^{-0.2 \int_r^H k ds} dr, \quad (6)$$

在 (6) 式中, σ_{surf} 为未知量, σ_0 , σ_{wind} 及降雨强度、高度等参数为已知量, 可由散射计、降雨雷达及数值预报提供, 因此, 利用 (6) 式可推导出雨表面扰动与降雨参数的定量关系.

3 匹配数据集

由降雨条件下的雷达方程可知, 散射计探测的标准化雷达后向散射截面不但与海面风场有关, 而且还与降雨引起的衰减、后向散射、海表面扰动有关. 为了分析降雨对散射计测风的影响, 构建经验模型关系, 本文利用 2010 年全年的 ASCAT 散射计数据、PR 数据和 ECWFMF 数值预报数据建立了 152969 点匹配数据集, 其中 ASCAT 散射计数据提供标准化雷达后向散射截面 σ_0 ; PR 数据提供空中三维降雨强度和海表面降雨强度等参数; ECWFMF 数值预报数据提供海面风场产品, 结合地球物理模式函数 CMOD5 求出 σ_{wind} .

ASCAT 散射计搭载在 METOP 卫星上, 是一种 C 波段垂直极化的散射计, 采用双边观测体制, 在卫星轨道的每侧均具有 3 根杆状天线, 中间天线的波束入射角范围为 25° — 53° , 前后天线的波束入射角范围为 34° — 64° , 它们以方位角 45° , 90° 和 135° 对每一个风矢量单元实现三次测量, 并利用海明窗函数将散射计测量值加权平均到 12.5 km 或 25 km 的网格上, 最后利用地球物理模式函数反演海面风场. 文中采用欧洲气象卫星应用组织提供的 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ 的 ASCAT 风矢量产品.

PR 测雨雷达搭载在 TRMM 卫星上, 工作频率为 13.8 GHz, 入射角范围为 0° — 17° , 星下点水平分辨率为 4.3 km, 径向分辨率为 250 m, 能够探测降雨的三维空间分布. 文中采用的 PR 数据为 NASA (美国国家航空航天局) 提供的二级产品中 2A25 数据, 分辨率高于 ASCAT 风矢量产品. 在建立匹配数据集时, 单个 ASCAT 风矢量数据对应多个匹配的 PR 降雨数据, 采用空间响应函数将多个 PR 降雨数据进行加权平均, 使其与单个 ASCAT 风矢量数据匹配, 另外, ASCAT 和 PR 观测几何关系不同, 需要进行投影变换. 单个 ASCAT 风矢量数据与多个匹配的 PR 降雨数据的关系如 (7) 式所示:

$$Rain_{ASCAT} = \frac{\sum_{i=1}^N w(i) Rain_{PR}(i) \cos \theta_{PR}(i)}{\cos \theta_{ASCAT} \sum_{i=1}^N w(i)}, \quad (7)$$

式中, $Rain_{PR}$ 为 PR 测雨雷达数据, N 为匹配的 PR 测雨雷达数据数量, $w(i)$ 为 ASCAT 的空间响应函数, 这里是海明窗函数, θ_{PR} 为 PR 测雨雷达的观测角, θ_{ASCAT} 为 ASCAT 散射计的入射角,

$Rain_{ASCAT}$ 为与 ASCAT 数据匹配后的 PR 测雨雷达数据.

海面风场数据采用 ECWMF 发布的空间分辨

率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 、时间分辨率为 6 h 的数值预报产品, 通过三线性插值将其匹配到与 ASCAT 风矢量数据对应的 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ 网格.

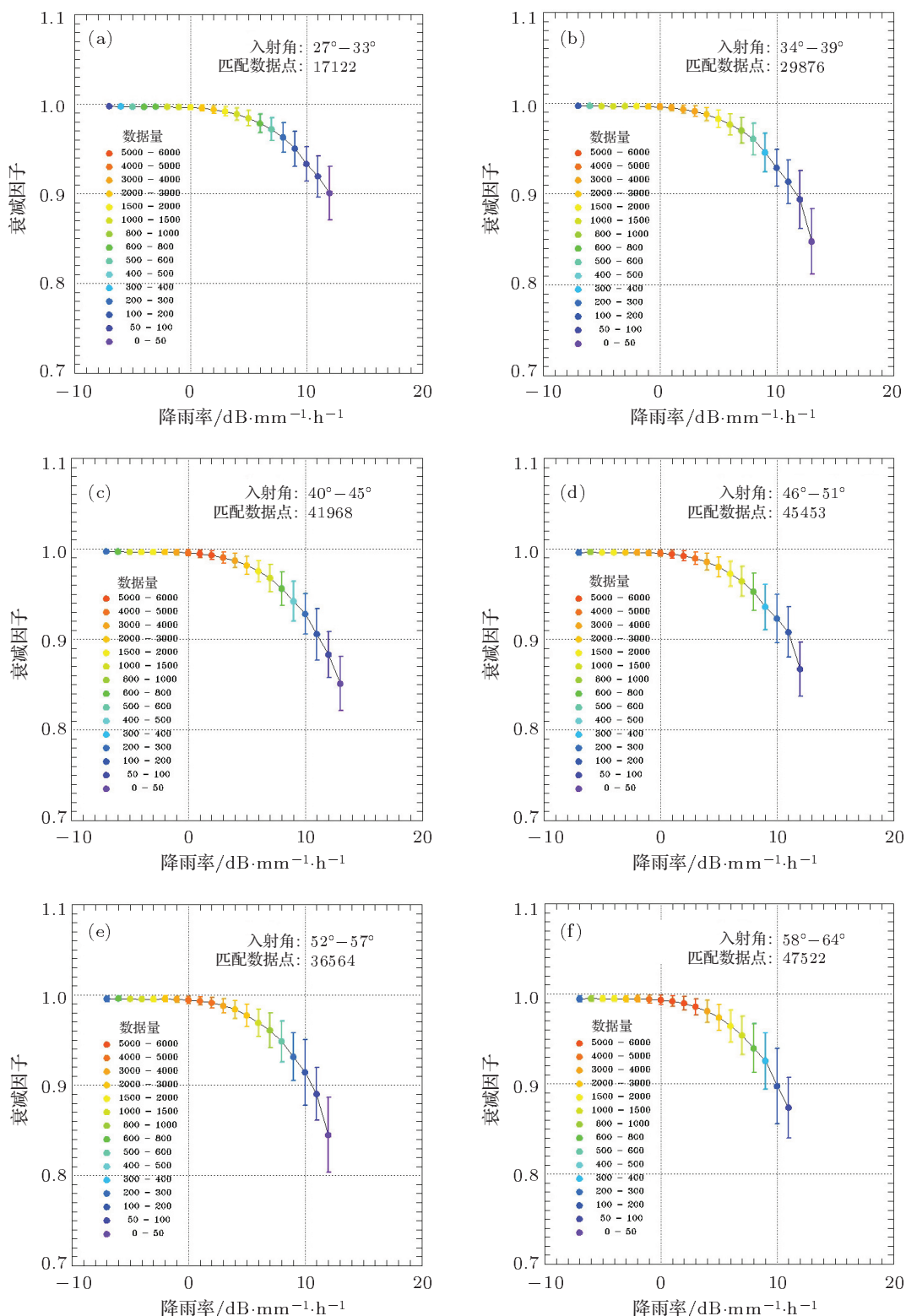


图 2 衰减因子与降雨强度、入射角的变化关系 (a) 入射角 $27^\circ-33^\circ$; (b) 入射角 $34^\circ-39^\circ$; (c) 入射角 $40^\circ-45^\circ$; (d) 入射角 $46^\circ-51^\circ$; (e) 入射角 $52^\circ-57^\circ$; (f) 入射角 $58^\circ-64^\circ$

4 降雨对散射计测风的影响

将本文建立的匹配数据集代入到降雨条件下的雷达方程, 定量分析降雨引起的散射计信号衰减、后向体散射、海表面扰动与降雨强度、入射角的关系.

4.1 降雨引起的散射计信号衰减

降雨对散射计信号的衰减因子与降雨强度、入射角的关系如图 2 所示.

图 2 中 (a)—(f) 分别为不同入射角时, 衰减因子与降雨强度的关系. 纵坐标为衰减因子, 横坐标为降雨强度, 单位 dB·mm/h. 颜色反映 1 dB·mm/h 降雨强度区间内的匹配数据量, 误差条反映 1 dB·mm/h 降雨强度区间内衰减因子的标准差和均值. 从图 2 中可以发现, 随着降雨强度的增加, 衰减因子减小, 降雨对散射计信号的衰减增强. 当降雨强度小于 0 dB·mm/h 时, 不同入射角的衰减因子均接近于 1, 变化很小, 降雨对散射计信号的几乎没有衰减; 当降雨强度大于 0 dB·mm/h, 衰减因子迅速减小, 降雨对散射计信号的衰减增强. 另外, 对比不同入射角的衰减因子与降雨强度的关系可以发现, 随着入射角的增加, 同一降雨强度下衰减因子逐渐减小, 降雨强度为 10 dB·mm/h 时, 入射角为 27°—33° 的衰减因子为 0.93, 入射角为 58°—64° 的衰减因子减小到 0.90, 这是因为入射角变大, 微波信号传输时经过的降雨路径增大, 受到的衰减增强.

4.2 降雨产生的有效后向体散射

降雨产生的有效后向体散射截面与降雨强度、入射角的关系如图 3 所示.

图 3 为不同入射角时, 有效后向体散射截面与降雨强度的关系. 纵坐标为有效后向体散射截面, 横坐标为降雨强度, 单位 dB·mm/h. 颜色反映 1 dB·mm/h 的降雨强度区间匹配数据量, 误差条反映 1 dB·mm/h 降雨强度区间有效后向体散射截面的标准差和均值. 从图 3 中可以发现, 随着降雨强度的增加, 有效后向体散射截面增大. 当降雨强度小于 3 dB·mm/h 时, 不同入射角的有效后向体散射截面接近于 0, 降雨产生的有效后向体散射可以

忽略不计; 当降雨强度大于 3 dB·mm/h, 有效后向体散射截面迅速增大. 另外, 对比不同入射角的有效后向体散射截面与降雨强度的关系可以发现, 随着入射角的增加, 同一降雨强度下的有效后向体散射截面缓慢减小, 降雨强度为 10 dB·mm/h 时, 入射角为 27°—33° 的有效后向体散射截面为 0.00077, 入射角为 58°—64° 的有效后向体散射截面减小到 0.00065, 这是因为随着入射角的增大, 微波信号传输时经过的降雨路径增大, 雨滴的后向体散射变大, 同时信号衰减增强. 由于信号衰减强于雨滴后向体散射截面的增加, 最终表现为有效后向体散射截面减小.

4.3 雨表面扰动产生的后向散射

雨表面扰动产生的后向散射目前还没有成熟的模型, 无法通过降雨强度直接计算. 由本文推导降雨条件下的雷达方程可知, 雨表面扰动产生的后向散射截面可表示为

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{surf}} = & \sigma_0 \cdot 10^{0.2 \int_0^H k dr} - \sigma_{\text{wind}} - 10^{0.2 \int_0^H k dr} \\ & \times \int_0^H 10^{-10} \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K_w|^2 Z_e(r) \\ & \times 10^{-0.2 \int_r^H k ds} dr. \end{aligned} \quad (8)$$

由 (8) 式可知, 利用 ASCAT 散射计测量的后向散射截面、PR 测量的三维降雨强度和海表面降雨强度以及 ECWFMF 提供海面风场数值预报数据可以间接获得雨表面扰动产生的后向散射与降雨强度、入射角的定量关系, 如图 4 所示.

图 4 为不同入射角时, 雨表面扰动产生的后向散射截面与降雨强度的关系. 纵坐标为雨表面扰动产生的后向散射截面, 横坐标为降雨强度, 单位 dB·mm/h. 颜色反映 1 dB·mm/h 的降雨强度区间匹配数据量, 误差条反映 1 dB·mm/h 降雨强度区间后向散射截面的标准差和均值. 从图 4 中可以发现, 随着降雨强度的增加, 后向散射截面逐渐增大. 另外, 对比不同入射角的后向散射截面与降雨强度的关系可以发现, 当入射角较小时, 后向散射截面的均值和标准差较大, 随着入射角的增大, 二者逐渐较小, 这主要是因为后向散射截面除了与入射角、降雨强度有关外, 还与雨滴落入海表面的时间长短有关, 但二者之间的相关性随着入射角的增大逐渐减弱.

对比图 3 和图 4, 雨表面扰动产生的后向散射截面比有效后向体散射截面大一个量级, 这说明雨表面扰动对散射计测风的影响要大于雨滴的后向体散射. 另外, 对比图 2, 图 3 和图 4 可知, 当降雨强

度较大时, 雨表面扰动和雨滴衰减对散射计测风的影响起主导作用, 随着降雨强度的减小, 雨滴衰减逐渐减小, 雨表面扰动对散射计测风的影响起主导作用.

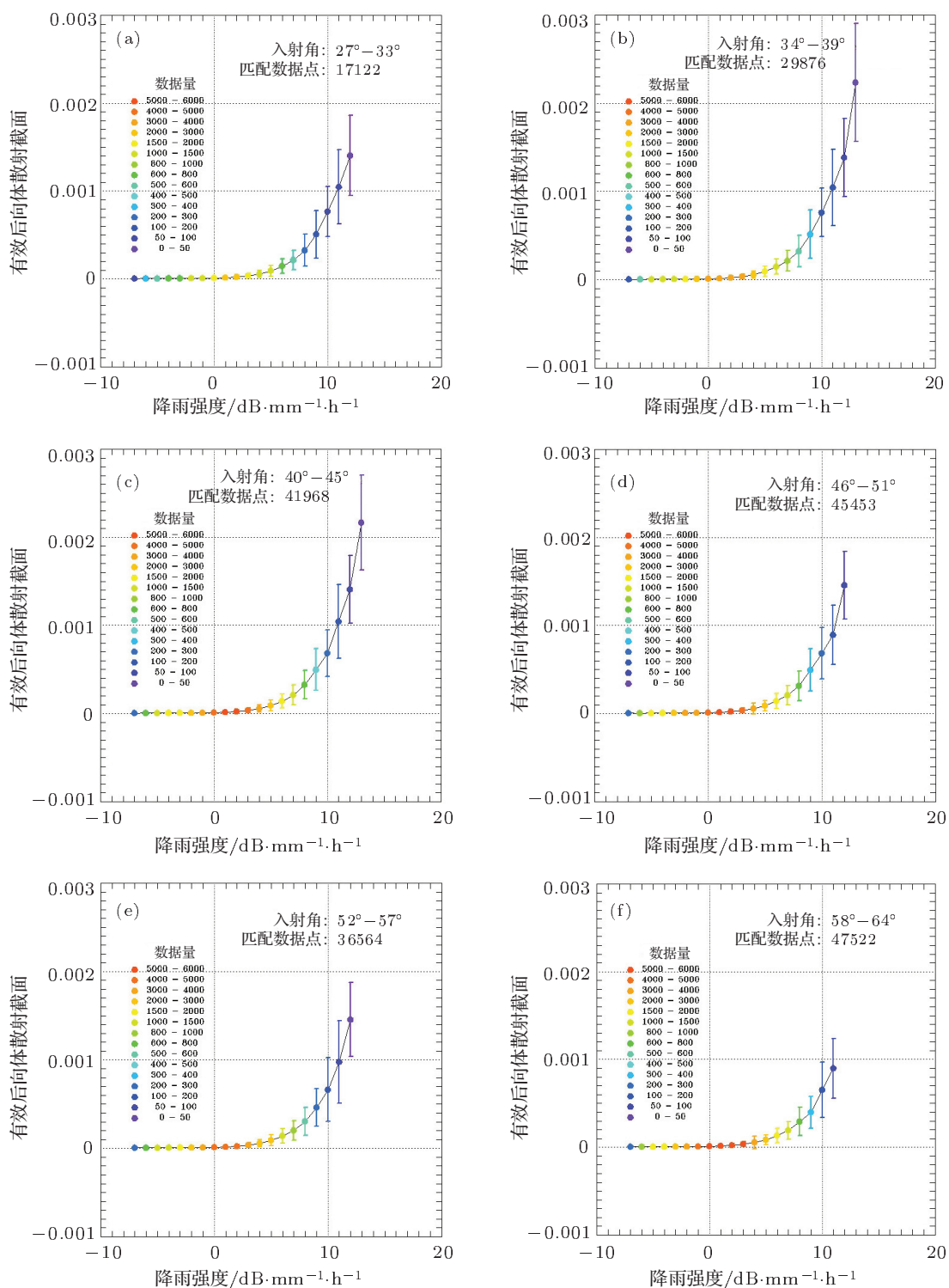


图 3 有效后向体散射截面与降雨强度、入射角的变化关系 (a) 入射角 27°—33°; (b) 入射角 34°—39°; (c) 入射角 40°—45°; (d) 入射角 46°—51°; (e) 入射角 52°—57°; (f) 入射角 58°—64°

5 降雨条件下 C 波段主动微波辐射传输模型

降雨通过衰减、后向体散射和雨表面扰动影响 C 波段散射计测风的精度, 其中, 后向体散射和

雨表面扰动产生的微波信号在返回散射计时, 将受到雨滴的衰减作用, 二者对散射计测风的影响可以合并考虑. 因此, 降雨条件下海面风场反演的校正模型即 C 波段主动微波辐射传输模型可表示为

$$\sigma_{\text{wind}} = \alpha_{\text{rain}}\sigma_0 - \sigma_{\text{rain}}, \quad (9)$$

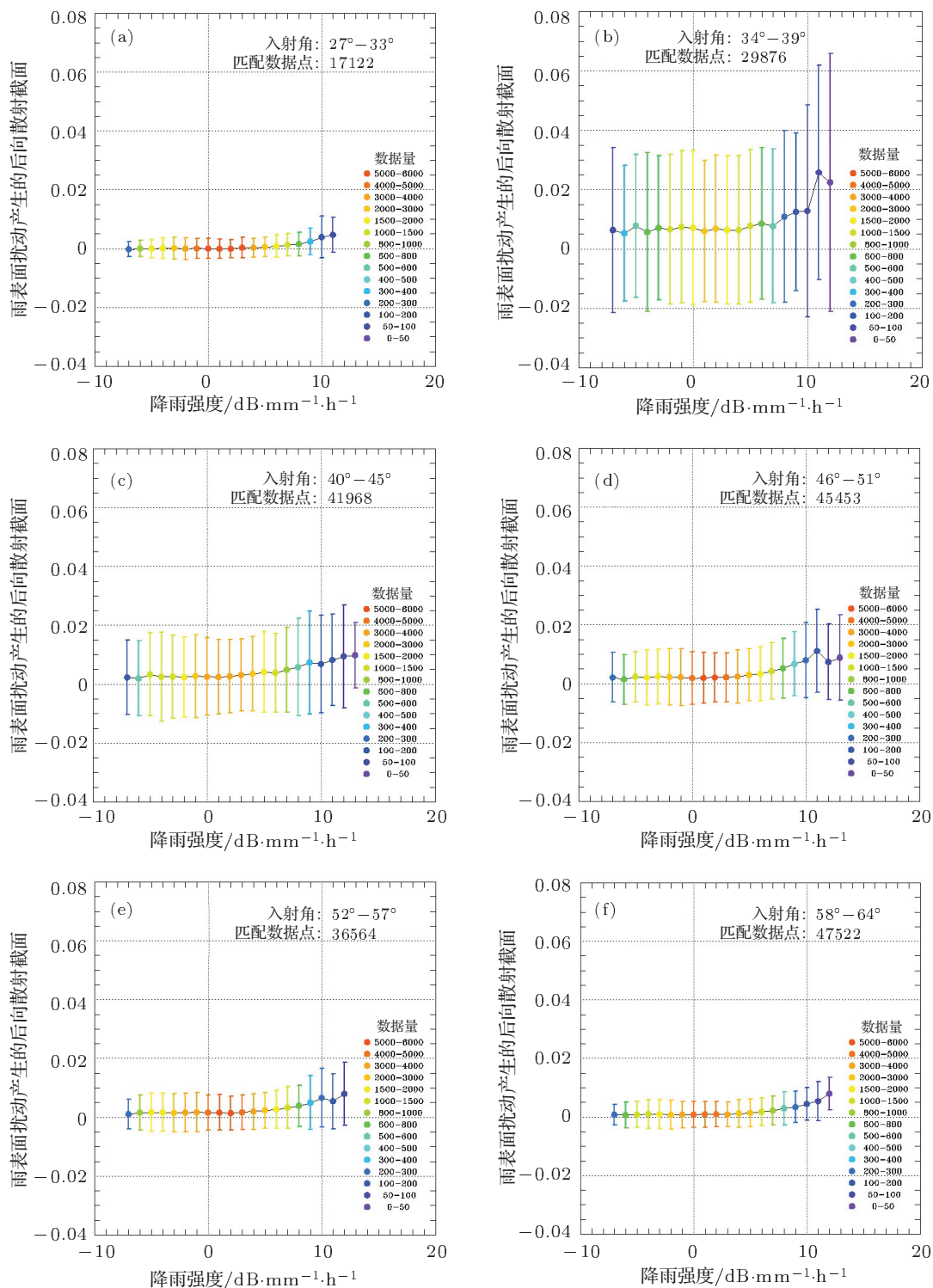


图 4 雨表面扰动产生的后向散射截面与降雨强度、入射角的变化关系 (a) 入射角 27°—33°; (b) 入射角 34°—39°; (c) 入射角 40°—45°; (d) 入射角 46°—51°; (e) 入射角 52°—57°; (f) 入射角 58°—64°

其中, $\alpha_{\text{rain}} = 10^{0.2 \int_0^H k_{\text{dr}}}$, $\sigma_{\text{rain}} = \sigma_{\text{surf}} + 10^{0.2 \int_0^H k_{\text{dr}}} \times \int_0^H 10^{-10} \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K_w|^2 Z_e(r) \cdot 10^{-0.2 \int_r^H k_{\text{ds}}} dr$. 利用三次多项式对 α_{rain} , σ_{rain} 与降雨强度的关系分别进行拟合, 得到 (10) 和 (11) 式:

$$\alpha_{\text{rain}}(\theta) = \sum_{n=0}^{n=3} p_n(\theta) R(\theta)^n, \quad (10)$$

其中 R 为降雨强度, 单位为 dB·mm/h, θ 为散射计入射角, p 为拟合系数, 不同入射角对应的拟合系数如表 1 所示.

表 1 α_{rain} 与降雨强度在不同入射角时的拟合系数

入射角/ $^\circ$	p_0	p_1	p_2	p_3
27—33	1.00×10^0	2.83×10^{-4}	2.67×10^{-4}	3.74×10^{-5}
34—39	1.00×10^0	-2.47×10^{-4}	2.66×10^{-4}	5.27×10^{-5}
40—45	1.00×10^0	-6.38×10^{-5}	2.93×10^{-4}	5.21×10^{-5}
46—51	1.00×10^0	2.28×10^{-4}	3.31×10^{-4}	4.98×10^{-5}
52—57	1.00×10^0	-5.51×10^{-5}	3.66×10^{-4}	6.35×10^{-5}
58—64	1.00×10^0	6.18×10^{-4}	4.41×10^{-4}	5.69×10^{-5}

$$\sigma_{\text{rain}}(\theta) = \sum_{n=0}^{n=3} q_n(\theta) R(\theta)^n, \quad (11)$$

其中 q 为拟合系数, 其他参数同上式. 不同入射角对应的拟合系数如表 2 所示.

利用 (9), (10), (11) 式对降雨条件下散射计的标准化雷达后向散射截面 σ_0 进行校正, 剔除降雨

的影响, 提取海面风场引起的后向散射截面 σ_{wind} , 然后通过地球物理模式函数反演海面风场.

表 2 σ_{rain} 与降雨强度在不同入射角时的拟合系数

入射角/ $^\circ$	q_0	q_1	q_2	q_3
27—33	6.59×10^{-3}	-2.93×10^{-4}	1.47×10^{-5}	1.20×10^{-5}
34—39	2.61×10^{-3}	9.48×10^{-5}	2.43×10^{-5}	2.14×10^{-6}
40—45	1.91×10^{-3}	1.03×10^{-4}	3.31×10^{-5}	1.61×10^{-6}
46—51	1.56×10^{-3}	1.16×10^{-5}	1.65×10^{-5}	3.04×10^{-6}
52—57	8.29×10^{-4}	-6.29×10^{-5}	1.29×10^{-5}	4.06×10^{-6}
58—64	2.48×10^{-6}	-4.26×10^{-5}	1.24×10^{-5}	3.43×10^{-6}

6 实验验证

为了验证本文提出的降雨条件下 C 波段主动微波辐射传输模型的精度, 卫星观测数据选用 2011 年 1 月和 2 月的 ASCAT 散射计和 PR 测雨雷达的数据, 比对数据选用 ECWFM 发布的海面风场数据. 通过定量分析降雨对散射计测风影响可以发现, 当降雨强度较小时, C 波段散射计测风受降雨的影响很小, 但随着降雨强度的增大, 影响逐渐增大, 这里选择降雨强度大于 10 mm/h 的实验数据进行验证分析.

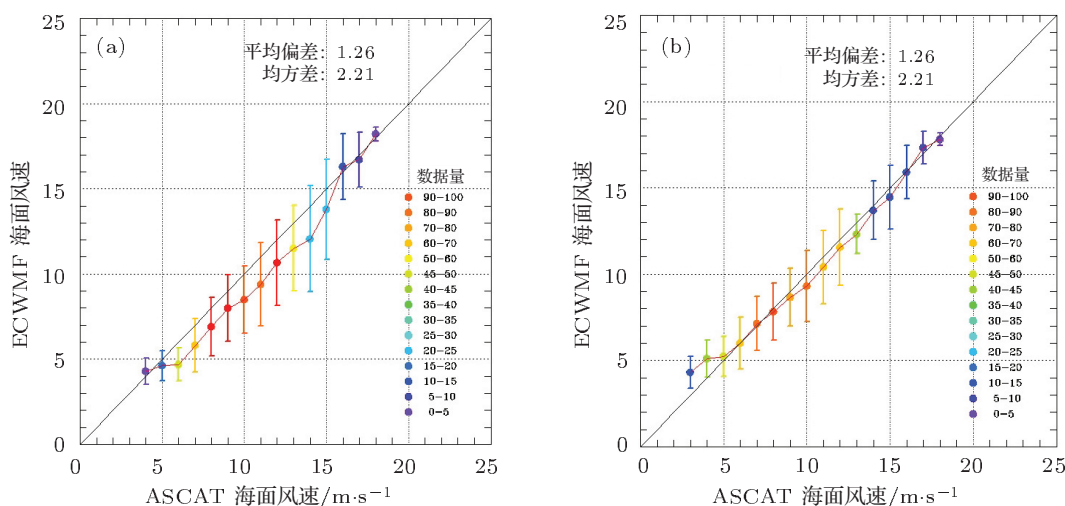


图 5 ASCAT 散射计反演的海面风速和 ECWFM 海面风速的比对结果 (a) 校正前; (b) 校正后

利用本文提出的降雨条件下 C 波段主动微波辐射传输模型对散射计测量的后向散射系数进行校正, 校正前后, ASCAT 散射计反演的海面风速和 ECWFM 海面风速的比对结果如图 5 所示, 海面

风向的比对结果如图 6 所示.

匹配数据量为 747. 由图 5 可知, 若忽略降雨的影响, ASCAT 散射计反演的海面风速总体大于 ECWFM 海面风速, 二者的平均偏差为 1.26 m/s,

均方差为 2.21 m/s. 利用本文提出的校正模型对 ASCAT 散射计测量的后向散射系数进行降雨校正后, 其反演的海面风速和 ECWMF 海面风速的平均偏差为 0.15 m/s, 均方差为 1.72 m/s, 小于校正前的比对数据, 说明本文提出的降雨条件下 C 波段主动微波辐射传输模型能够改善 ASCAT 散射计反演的海面风速精度.

由图 6 可知, 校正前, ASCAT 散射计反演的海

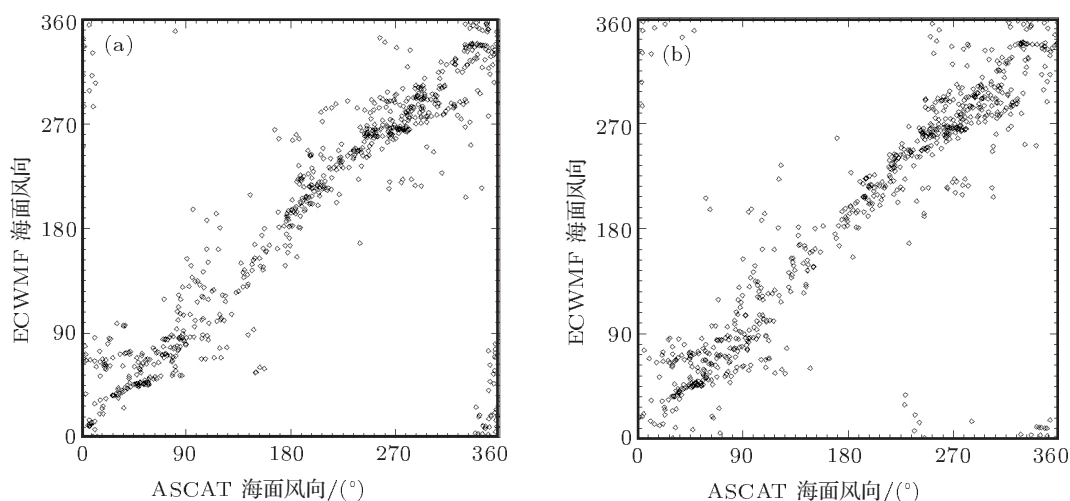


图 6 ASCAT 散射计反演的海面风向和 ECWMF 海面风向的比对结果 (a) 校正前; (b) 校正后

由上述分析结果可知, 本文提出的降雨条件下 C 波段主动微波辐射传输模型能够改善 ASCAT 散射计反演的海面风向精度.

7 结论

降雨通过雨滴衰减、雨滴后向体散射及雨表面扰动等三个因素改变散射计测量的后向散射截面, 进而影响其测风的精度. 本文基于这三个方面的影响因素, 推导了降雨条件下的雷达方程, 构建了 2010 年全年的 ASCAT 散射计、TR 降雨雷达和 ECWMF 数值预报的匹配数据集, 定量分析了降雨对 C 波段散射计测量后向散射截面的影响, 发现雨滴对散射计信号的衰减随降雨强度和入射角的增大而增强; 雨滴的有效后向体散射截面随降雨强

面风向和 ECWMF 海面风向的平均偏差为 5.35° , 均方差为 84.51° , 剔除 180° 方向模糊的数据并考虑风向 0° 和 360° 的数据连续性后, 平均偏差为 -4.98° , 均方差为 25.83° . 校正后, 二者的平均偏差为 -1.68° , 均方差为 68.47° , 剔除 180° 方向模糊的数据并考虑风向 0° 和 360° 的数据连续性后, 平均偏差为 -2.72° , 均方差为 22.34° , 二者均小于校正前的比对数据.

度的增大而增大、随入射角的增大而缓慢减小; 雨表面扰动产生的后向散射截面大于雨滴的有效后向体散射截面, 并随降雨强度的增大而增大、随入射角的增大而减小.

另外, 利用推导的降雨条件下雷达方程和建立的匹配数据集, 本文提出了降雨条件下的 C 波段主动微波辐射传输模型, 然后利用 2011 年 1 月和 2 月的 ASCAT 散射计、TR 降雨雷达和 ECWMF 数值预报数据进行了实验验证, 结果表明, 本文提出的校正模型能够改善 ASCAT 散射计测风的精度.

C 波段散射计 ASCAT 是目前获取台风海面风场的主要探测手段, 降雨是台风的主要特征之一, 本文研究成果可应用于台风海面风场反演, 这对于开展台风的监测、路径预测与疏散预警具有重要意义.

- [1] Bryan W S, Simon H Y 2002 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **40** 1973
- [2] David W D, David G L 2004 *J. Geophys. Res.* **109** C02005
- [3] Zhang L, Huang S X, Zhong J, Du H D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7479 (in Chinese) [张亮, 黄思训, 钟剑, 杜华栋 2010 物理学报 **59** 7479]
- [4] Nielsen S N 2007 *M.S. Dissertation* (Brigham: Brigham Young University)
- [5] Nie C, Long D G 2007 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **45** 621
- [6] Craeye C, Sobieski P W, Bliven L F 1997 *Int. J. Remote Sens.* **18** 2241
- [7] Bliven L F, Sobieski P, Craeye C 1997 *Int. J. Remote Sens.* **18** 221
- [8] Owen M P, Long D G 2010 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **49** 4431
- [9] Liu Y G 2009 *Satellite Oceanography* (Beijing: Higher Education Press) p229 (in Chinese) [刘玉光 2009 卫星海洋学 (北京: 高等教育出版社) 第 229 页]
- [10] Battan L J 1973 *Radar Observation of the Atmosphere* (Chicago: The University of Chicago Press) p64
- [11] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K 1981 *Microwave Remote Sensing* (Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company) p219

Rain effect on C-band scatterometer wind measurement and its correction*

Zhou Xuan¹⁾²⁾ Yang Xiao-Feng^{1)†} Li Zi-Wei¹⁾ Yu Yang¹⁾ Ma Sheng¹⁾

1) (*Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

2) (*61741 Troops of PLA, Beijing 100095, China*)

(Received 22 August 2011; revised manuscript received 14 November 2011)

Abstract

It is viewed traditionally that the attenuation and scattering of rain have no effect on C-band scatterometer because its wavelength is greater than the diameter of raindrops, so rain effects on C-band scatterometer wind measurement are often ignored. According to the attenuation and the volume backscatter of the scatterometer signal by raindrops and the perturbation of the water surface by rain, in this paper, we derive the radar equation of the rainfall, collect the data from ASCAT backscatter, rain data from PR and wind field from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts in 2010, and quantitatively analyze the influence of rainfall on the normalized radar backscattering cross section of the C-band scatterometer. Our results show that the attenuation increases as the rain rate and the incidence angle increase, the volume backscatter and the perturbation of the water surface increase with the increase of rain rate and decrease with the increase of incidence angle, and the influence of the perturbation on the wind measurement of the scatterometer is greater than the volume backscatter. In addition, we establish the C-band active microwave radiative transfer model for the rainfall by the radar equation and the collected data. The experimental results indicate that the new model can improve the C-band scatterometer wind measurement accuracy under rainfall conditions.

Keywords: rain rate, C-band scatterometer, radiative transfer model, sea surface wind field

PACS: 92.40.eg, 93.85.-q, 84.40.Xb, 92.60.Gn

* Project supported by the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Science (Grant No. Y0S04300KB), the Major Program for the Research Equipment of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. YZ200946) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA09Z137).

† E-mail: yangxf@irsa.ac.cn